

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПИЩЕВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

В.Г.Коротков¹, Р.Ф.Сагитов², В.П.Попов¹, Е.У. Арыстаналиев³, Л.Х. Галиева³, З.Р. Ахмадиева⁴, Е.А.Цыркаева⁴

¹Оренбургский государственный университет, Оренбург, Россия;

²ООО «Научно-исследовательский и проектный институт экологических проблем», Оренбург, Россия

³Атырауский университет нефти и газа, г. Атырау, Республика Казахстан

⁴Кумертауский Филиал Оренбургского государственного университета, Кумертау, РБ, Россия

В настоящее время большое внимание уделяется проблемам рационального питания (производство продуктов повышенной пищевой ценности) и разработке энергосберегающих технологий пищевой продукции.

К продуктам повышенной биологической ценности можно отнести так называемые нетрадиционные макаронные изделия (изделия с использованием пшеничных отрубей, сухой клейковины, плодовоовощной мезги, крахмала и т.д.). Значительный вклад в производство нетрадиционных макаронных изделий внесли Г.М. Медведев, Р.Д. Поландова, В.Д. Малкина, В.Я. Черных и др. Предыдущими исследователями разработаны различные технологии производства нетрадиционных макаронных изделий, однако, все они имеют значительную энергоемкость, получаемая продукция более низкое качество, чем традиционная. Единой технологии и оборудования, позволяющих вырабатывать как традиционные, так и не традиционные макаронные изделия в настоящее время не существует. В связи с вышеизложенным, является актуальным проведение исследований по разработке энерго- и ресурсосберегающих техники и технологии для производства как традиционных, так и не традиционных макаронных изделий.

В настоящее время известны различные способы приготовления макаронного теста [1,2] отличающиеся температурой и влажностью теста [1-3]. По данным Г.М. Медведева при производстве макаронных изделий из нетрадиционного сырья (со сниженным содержанием или отсутствием клейковины) ведущие зарубежные фирмы применяют частичную клейстеризацию крахмала [2,3]. Применение данной технологии приводит к значительному увеличению энергоемкости производства [3].

Вместе с тем, в пищевой промышленности перспективным является использование процессов, осуществляемых путем непосредственно контакта электрического тока с продуктом. Простота аппаратного оформления, высокий КПД, быстротечность, достаточно высокая равномерность температурного поля, доступность контроля и регулирования энергетических параметров - все свойственно электроконтактному методу[4].

Однако применение на стадии замеса нетрадиционного сырья, частичной клейстеризации и электроконтактного воздействия приводит к значительному изменению реологических свойств макаронного теста [5], а как следствие к необходимости создания инструмента оперативного управления ими в процессе экструдирования.

Реологические свойства макаронного теста рассматривали Калинин Ю.В., Максимов А.С., Назаров Н.И., Буров Л.А., Мачихин Ю.А., Николаев Б.А.[5-7].

Формование макаронных изделий, как правило осуществляется методом экструзии. Движение макаронного теста в канале шнека наиболее точно описывается реологической моделью Бингама [5,8].

Следующим этапом после экструдирования в процессе производства макаронных изделий является, как правило, их сушка. Исследователями Г.М. Медведевым, В.В. Манком, Jajima Mizio, Asama Chemicai Co, Tecedor Silverio Luis, Schryg Richard F. и т.д. изучались различные способы сушки как традиционных, так и не традиционных макаронных изделий и было установлено, что реологические свойства, получаемые при экструзии полуфабрикатов, существенно влияют на интенсивность и энергоёмкость их сушки [9,10].

Следует отметить, что предыдущими исследователями практически не изучались реологические характеристики макаронного теста непосредственно в ходе его экструдирования, не исследовались реологические характеристики теста из нетрадиционного сырья и не разрабатывались конструктивные элементы для их измерения [11].

В настоящее время имеется определенный успех в области математического моделирования процессов тепломассопереноса полимерных материалов в экструдере. Большой вклад в изучение процессов тепломассопереноса в экструдере внесли: Тадмор З, Раувендааль К., Торнер Р.В., Виноградов Г.В., Володин В.П., Шварцманн П. и др. [12]. Представленные в работах модели подразумевают переработку однородных легко пластифицируемых материалов, которые в разогретом состоянии представляют из себя псевдо пластические тела. Данные модели не подходят для описания процессов движения и теплообмена при экструдировании макаронного теста, так как оно по своей структуре представляет из себя неоднородное упруго-вязко-пластичное тело, содержащее зерна крахмала и нити белка, что не возможно учесть в выше представленных моделях.

Таким образом, создание математической модели процесса эструдирования макаронного теста является актуальной задачей в настоящее время.

За основу при составлении математической модели представленной в статье были взяты труды Калинина Ю.В., Мачихина С.А., Николаева Б.А., Тимофеевой Д.В., Короткова В.Г., Полищука В.Ю., Зубковой Т.М. и др. [5, 7] посвященных изучению реологических свойств макаронного теста и математическому описанию процессов движения и теплообмена при экструдировании клейковинобелковокрахмалсодержащего материала по своей структуре близкого к макаронному тесту.

Движение макаронного теста описывается моделью Бингама, для общего случая:

$$\dot{\gamma} = \frac{\dot{\tau}}{G} + \frac{(\tau - \tau_0)}{\eta_{nl}}, \quad (1)$$

где $\dot{\gamma}$ – скорость сдвига, с^{-1} ;

$\dot{\tau}$ – скорость изменения касательного напряжения, Па/с ;

τ – касательное напряжение, Па ;

τ_0 – предел текучести при сдвиге, Па ;

G – модуль упругости при угловой деформации, Па ;

η_{nl} – вязкость при сдвиге, $\text{Па} \cdot \text{с}$.

Авторами статьи предлагается для оценки интенсивности произошедших в экструдере преобразований использовать крутящий момент на выходе из экструдера, измеряемый при помощи специальных насадок [12].

При этом уравнение для крутящего момента имеет вид:

$$M_{\vartheta} = (\dot{\gamma} \cdot \eta_{nl} \cdot \tau_0) \cdot \left(1 - e^{-\frac{G}{\eta_{nl}} t} \right) \cdot 2\pi R L^2 \quad (2)$$

где R – внутренний радиус насадки, м;

t – время прохождения перерабатываемого материала через насадку, с;

L – длина канала насадки, м.

Для оценки интенсивности воздействия процесса экструзии на обрабатываемый продукт в фильере матрицы можно использовать среднюю скорость сдвига псевдопластического материала, которую можно определить из выражения:

$$\dot{\gamma}_{u.c.p.m} = R_l \cdot \left(\frac{\tau_{cm} - 2\tau_0}{4\eta_{nl}} \right) - \frac{2\tau_{cm}}{3G} \quad (3)$$

где τ_{cm} – касательное напряжение у стенки фильеры;

R_l – радиус фильеры, м;

В выражениях 2 и 3 величины τ_0 , η_{nl} , G требуют идентификации.

С целью идентификации переменных величин получены уравнения регрессии имеющие следующий вид:

$$\begin{aligned} \tau_0 &= 14,5127 - 1,6485 \cdot t_1 + 0,9319 \cdot M_C \cdot t_1 + 1,0241 \cdot t_1 \cdot \omega_3 + \\ &+ 0,887 \cdot M_C \cdot \omega_3 + 0,9825 \cdot M_C \cdot t_1 \cdot \omega_3 + 1,4076 \cdot M_C^2 - 2,1291 \cdot \omega_3^2 \\ \eta_{nl} &= 0,2113 + 0,0095 \cdot M_C - 0,019 \cdot t_1 + 0,0117 \cdot t_1 \cdot \omega_3 + \\ &+ 0,01424 \cdot M_C \cdot t_1 \cdot \omega_3 - 0,0229 \cdot M_C^2 - 0,0249 \cdot \omega_3^2 \\ G &= 0,0659 - 0,0071 \cdot t_1 + 0,0078 \cdot \omega_3 + 0,0098 \cdot M_C \cdot t_1 + \\ &+ 0,0094 \cdot M_C \cdot \omega_3 + 0,0072 \cdot M_C \cdot t_1 \cdot \omega_3 + 0,0207 \cdot M_C^2 - 0,0212 \cdot \omega_3^2 \end{aligned} \quad (4)$$

где M_C – исходный момент смешивания сырья (зависит от химического состава и свойств сырья, определяется с помощью специальной насадки [12]);

t_1 – исходная температура макаронного теста;

ω_3 – частота вращения шнека экструдера.

Величины M_C , t_1 , ω_3 в условных единицах.

Для перевода условных единиц в натуральные используются уравнения:

$$\begin{aligned} M_C' &= 0,0013 \cdot M_C - 1,6667 \\ t_1' &= 0,0667 \cdot t_1 - 2,6667 \end{aligned} \quad (5)$$

$$\omega'_9 = 0,0333 \cdot \omega_9 - 2$$

где единицы измерения величин: M'_c - Н·м, t'_1 - с, ω'_9 - рад/с.

С целью установления границ применения модели были установлены рекомендуемые диапазоны значений параметров процесса экструдирования.

Для выявления диапазонов значений параметров процесса экструдирования макаронных изделий были проведены трехфакторные эксперименты на основе композиционного ортогонального плана ПФЭ 2^3 с использованием следующих параметров:

- вращающий момент смешивания;
- угловая скорость вращения шнека;
- коэффициент сопротивления матрицы экструдера.

В качестве критериев эффективности взяты:

- комплексный показатель качества макаронных изделий (КПК);
- экспертная оценка свойств сырых и готовых макаронных изделий (ЭО);
- удельные затраты энергии на проведение процесса (УЗЭ).

По результатам эксперимента получены уравнения регрессии, адекватно описывающие экспериментальные данные при уровне значимости $P = 0,95$:

- для экспертной оценки свойств макаронных изделий:

$$\begin{aligned} \text{ЭО} = & 373,75 - 93 \cdot \omega_9 - 12,12 \cdot M_c - 100,9 \cdot k_{cm} - 17,37 \cdot \omega_9 \cdot M_c + \\ & + 20,2 \cdot M_c \cdot k_{cm} + 23,12 \cdot \omega_9 \cdot M_c \cdot k_{cm} + 52,24 \cdot \omega_9^2 + 63,63 \cdot M_c^2 - 134,7 \cdot k_{cm}^2 \end{aligned} \quad (6)$$

- для комплексного показателя качества макаронных изделий:

$$\begin{aligned} \text{КПК} = & 68,92 - 12,57 \cdot \omega_9 - 2,3 \cdot M_c - 9,83 \cdot k_{cm} + 3 \cdot \omega_9 \cdot k_{cm} + 19,5 \cdot \omega_9^2 + \\ & + 9,5 \cdot M_c^2 - 21,3 \cdot k_{cm}^2 \end{aligned} \quad (7)$$

- для удельных затрат энергии на проведение процессов смешивания и прессования:

$$\begin{aligned} \text{УЗЭ} = & 63,13 - 10,7 \cdot \omega_9 + 18,18 \cdot M_c - 11,8 \cdot k_{cm} - 4,25 \cdot \omega_9 \cdot M_c + \\ & + 5,58 \cdot M_c \cdot k_{cm} - 4,16 \cdot \omega_9 \cdot M_c \cdot k_{cm} - 1,9 \cdot \omega_9^2 - 1,8 \cdot M_c^2 + 1,3 \cdot k_{cm}^2 \end{aligned} \quad (8)$$

где ω_9 - угловая скорость вращения шнека пресса-экструдера;

M_c - крутящий момент после смешивания;

K_{cm} - коэффициент сопротивления матрицы.

Для перевода величин, входящих в уравнения, в натуральную размерность, можно воспользоваться нижеприведенными выражениями

$$\begin{aligned} \omega'_9 &= 5 \cdot \omega_9 + 15 \\ M'_c &= 750 \cdot M_c + 1250 \\ k'_{cm} &= 18 \cdot k_{cm} + 22 \end{aligned} \quad (9)$$

Графоаналитическую оптимизацию процесса проводили путем построения поверхностей отклика и их наложения. На рисунке 1 представлен пример полученной поверхности отклика.

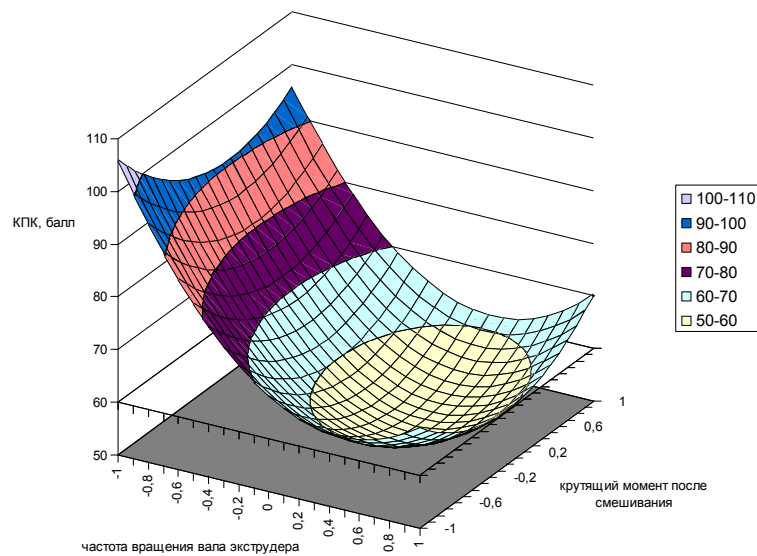
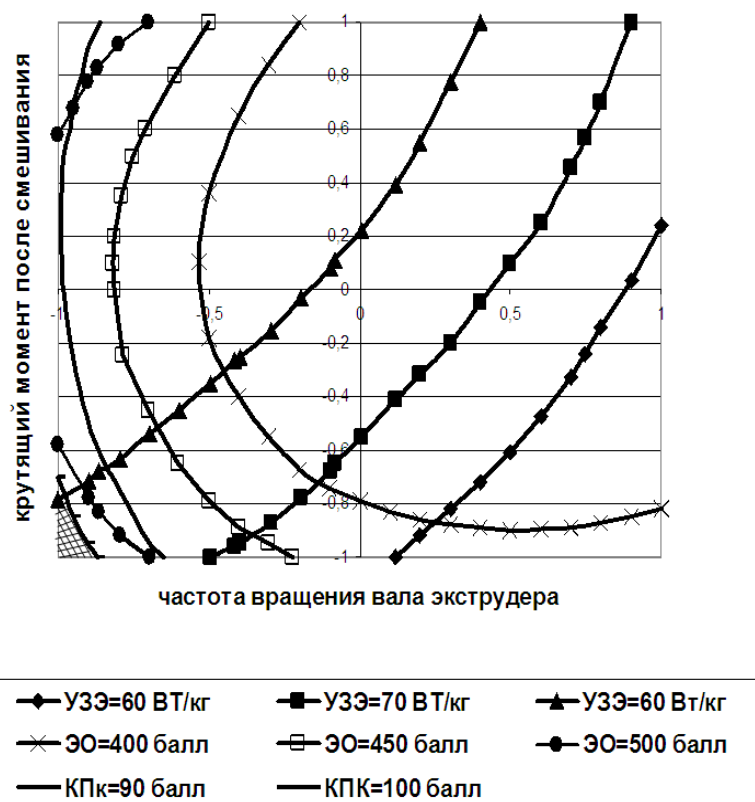
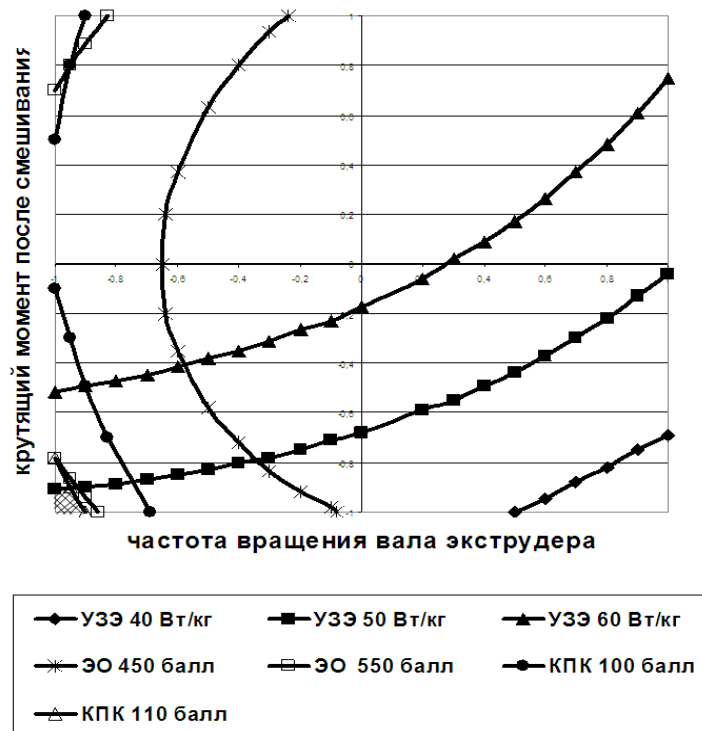


Рис. 1. Зависимость комплексного показателя качества от частоты вращения вала экструдера и крутящего момента после смешивания при $K_{см} = 4\%$ (-1 у.е.)

Для проведения графоаналитической оптимизации использовались горизонтальные проекции полученных плоскостей отклика.

Рис. 2. Оптимизация процесса экструдирования $K_{см} = 4\%$ ($= -1$ у.е.)Рис. 3. Оптимизация процесса прессования ($K_{см} = -0,5$)

Анализ диаграммы (рисунок 3), полученной в результате наложения поверхностей (приложения Ж1, 31, И1) показывает, что для $k_{см} = -0,5$ оптимальная область, ограничена линиями: ЭО = 550 баллов, КПК = 110 баллов, УЗЭ = 60 Вт/кг. При этом угловая скорость шнека экструдера должно составлять от 30 до 38 рад/с ($-1 \div -0,73$ в безразмерном выражении), крутящий момент после смешивания от 500 до 562 Н*м ($-1 \div -0,917$ в безразмерном выражении).

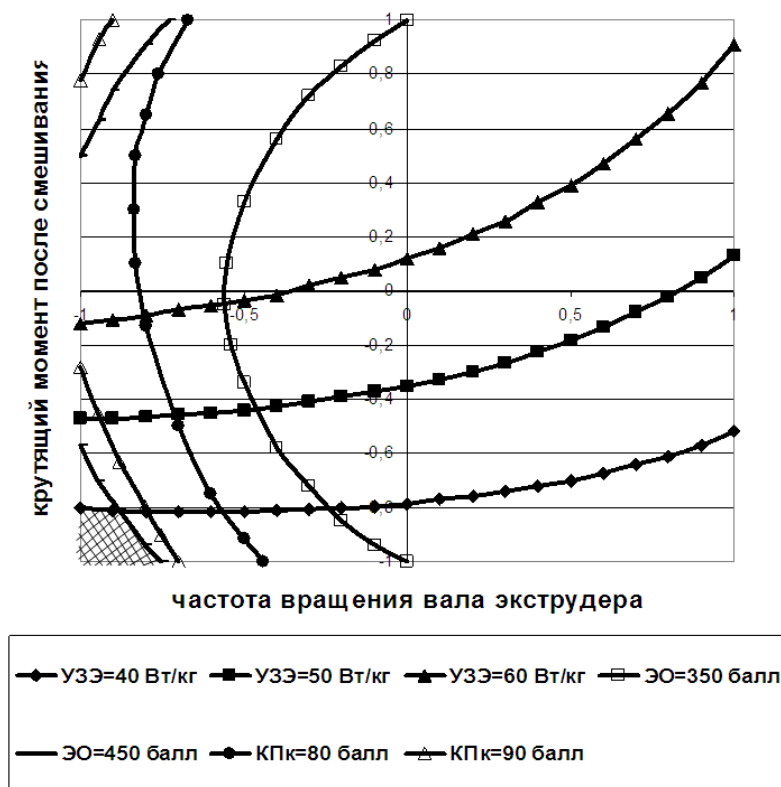
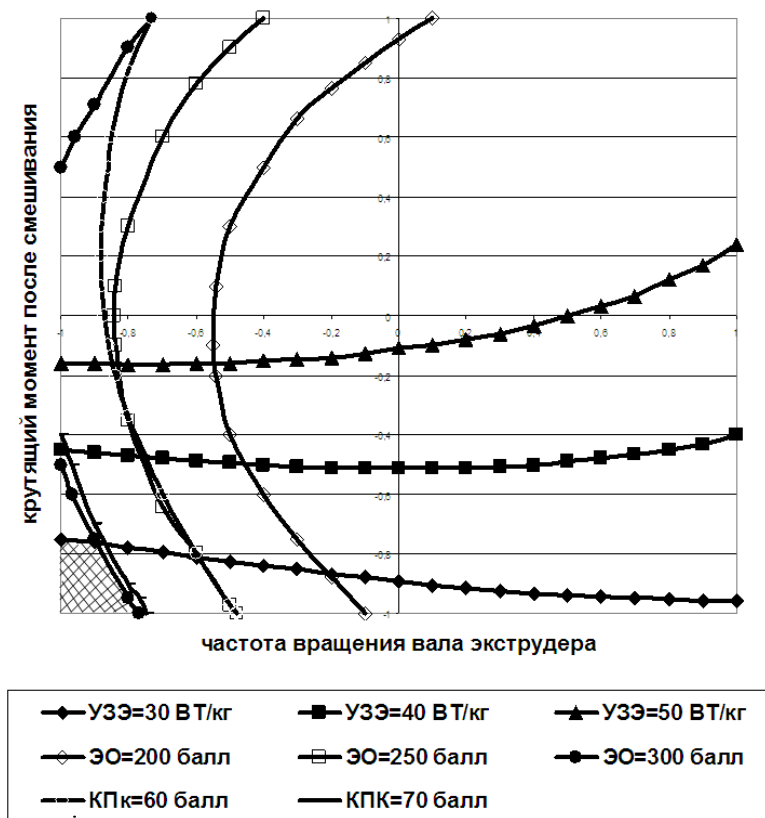
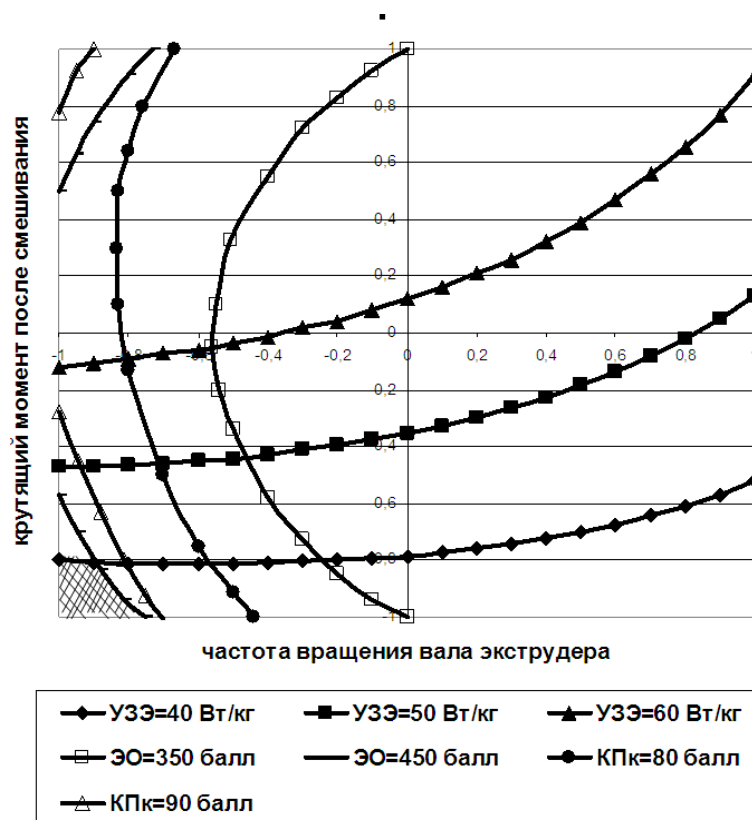


Рис. 4. Оптимизация процесса прессования ($K_{см} = 0$)

Анализ диаграммы (рисунок 4), полученной в результате наложения поверхностей (приложения Ж2, 32, И2) показывает, что для $k_{см} = 0$ оптимальная область, ограничена линиями: ЭО = 550 баллов, КПК = 110 баллов, УЗЭ = 50 Вт/кг. При этом угловая скорость шнека экструдера должно составлять от 30 до 33 рад/с ($-1 \div -0,9$ в безразмерном выражении), крутящий момент после смешивания от 500 до 575 Н*м ($-1 \div -0,9$ в безразмерном выражении).

Рис. 5. Оптимизация процесса прессования ($k_{см} = 0,5$)

Анализ диаграммы (рисунок 5), полученной в результате наложения поверхностей (приложения ЖЗ, ЗЗ, ИЗ) показывает, что для $k_{см} = 0,5$ оптимальная область, ограничена линиями: ЭОц = 450 баллов, КПК = 90 баллов, УЗЭ = 30 ВТ/кг. При этом угловая скорость шнека экструдера должно составлять от 30 до 37,4 рад/с ($-1 \div -0,753$ в безразмерном выражении), крутящий момент после смешивания от 500 до 650 Н*м ($-1 \div -0,8$ в безразмерном выражении).

Рис. 6. Оптимизация процесса прессования ($K_{см} = 1$)

Анализ диаграммы (рисунок 6), полученной в результате наложения поверхностей (приложения Ж4, 34, И4) показывает, что для $k_{см} = 1$ оптимальная область, ограничена линиями: ЭО = 300 баллов, КПК = 70 баллов, УЗЭ = 40 Вт/кг. При этом угловая скорость шнека экструдера должно составлять от 30 до 36,9 рад/с ($-1 \div -0,77$ в безразмерном выражении), крутящий момент после смешивания от 500 до 687 Н*м ($-1 \div -0,75$ в безразмерном выражении).

В результате наилучшие параметры эффекта получены для матрицы с $k_{см} = 0$ у.е. Уменьшение коэффициента сопротивления матрицы приводит к небольшому снижению качества полуфабриката и к увеличению удельных затрат энергии. Увеличение коэффициента сопротивления матрицы приводит к снижению удельных затрат энергии при значительном ухудшении качества полуфабрикатов.

Результаты графоаналитического поиска оптимальных параметров процессов смешивания и прессования сведены в таблицу 1.

Таблица 1. Оптимальные параметры процессов смешивания и прессования

$K_{см}, \%$	$\omega_{э}, \text{об/мин}$	$M_c, \text{Н*м}$
4	30...34	500...665
13	30...38	500...562
22	30..33	500...575
31	30...37,4	500...650
40	30...36,9	500...687

Разработанная математическая модель позволит путем измерения крутящего момента на выходе из экструдера рассчитать реологическое состояние макаронного теста в любой точке экструдера, что в свою очередь позволит грамотно рассчитать конструкцию экструдера.

Полученные уравнения взаимосвязи коэффициентов уравнений модели от технологических параметров позволяют наиболее полно учесть особенности перерабатываемого материала в математической модели.

Попадание в данные границы диапазонов эффективности обеспечивает максимально высокое качество макаронных изделий.

Библиографический список:

1. Чернов М.Е. Анализ макаронного производства и возможные направления его совершенствования // Хлебопечение России, 1998, №2. – С.20 – 21.
2. Карташов Л.П., Полищук В.Ю. Системный синтез технологических объектов АПК. – Екатеринбург: УроРАН, 1998. – 183 с.
3. Малышкина, В.А. Применение нетрадиционного сырья для производства макаронных изделий / В.А. Малышкина, Г.Б. Зинюхин, А.Г. Белова, Г.А. Сидоренко, В.П. Попов // Вестник Оренбургского государственного университета. 2004. № 2. С. 168 – 170.
4. Бочкарева, И.А. Оптимизация процесса производства макаронных изделий специального назначения с использованием тыквенной мезги / И.А. Бочкарева, В.П. Попов, А.Г. Зинюхина // Вестник Оренбургского государственного университета. 2014. № 9 (170). С. 226 – 230.
5. Шрейдер, М.Ю. Устройство для испытания пищевых материалов на растяжение / М.Ю. Шрейдер, В.А. Малышкина, Е.В. Ханина, В.П. Попов, А.М. Пищухин // патент на изобретение RUS 2293316 21.10.2004.
6. Горбатов, А.В. Структурно-механические характеристики пищевых продуктов/ под ред. А.В. Горбатова, А.М. Маслова, Ю.А. Мачихина и др. – М.: Легкая и пищевая промышленность, – 1982. – 296 с.
7. Launay B., Guveliver G. Matériaux alimentaires et rhéologie// Ind. Alim.et. agr, 1999.116, №11.- S. 37- 48.
8. Tscheuschner H. D., Doan Du. Modellierung rheologischer Eigenschaften fester Lebensmittel, dargestellt am Beishiel Apfel// Lebensmittelindustrie, 32 (1985), H.6. – S. 251 – 255.
9. Попов, В.П. Разработка технологии производства сухих полуфабрикатов крекеров с использованием варочных экструдеров / В.П. Попов // автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Москва, 1995. – 22 с.
10. Выгодин, В.А. Экструзионная техника и технология: состояние, перспективы / В.А. Выгодин, В.Л. Касперович, Г.Б. Зинюхин, В.П. Попов, В.А. Буцко // Пищевая промышленность. 1995. № 7. С. 4.
11. Назаров Н.И. Технология макаронных изделий. – М.: Пищевая промышленность, 1978. – 288 с.
12. Пищухин, А.М. Конструирование сложного технологического оборудования на основе метасистемного подхода / А.М. Пищухин, В.П. Попов // Сборник материалов Международной научной конференции, посвященной 60-летию Оренбургского государственного университета: Наука и образование: фундаментальные основы, технологии, инновации. Оренбург, 2015. С. 34 – 40.